

Miklós Gábor :

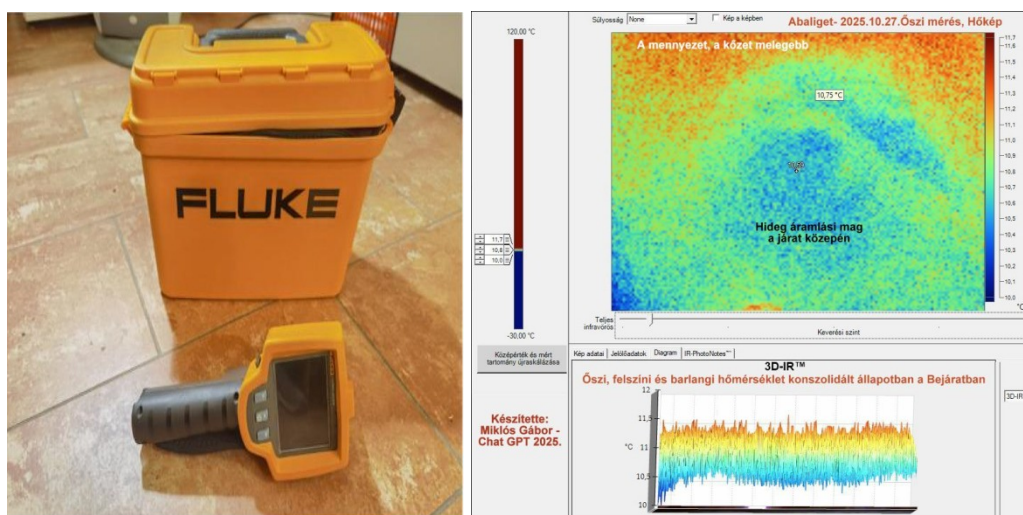
Az Abaligeti-barlang termikus alapkutatása infra kamerával , az Abaligeti modell 2025.

1. Bevezetés

A Duna-Dráva Nemzeti Park Igazgatóság engedélye alapján (DDNPI/920-2 /2025.) az Abaligeti- barlangban (ktsz. 4120) tudományos kutatásokat végeztünk.

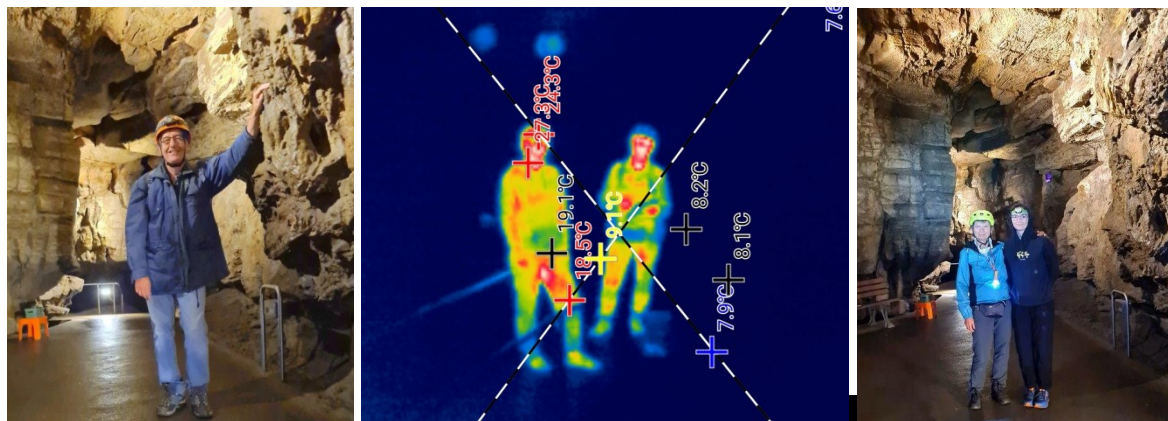
A kutatás célja a barlang klimatológiai sajátosságainak feltárása a fő ág teljes hosszában, hőkamerás felvételek készítésével. Eddig a klasszikus barlangklíma értelmezések jellemzően a külső – belső hőmérsékleti különbségek egyszerű hatásmechanizmusaira épültek. Mérésünkben az újdonság az, hogy a teljes járat – keresztmetszeten mérünk, beleértve a határoló falakat is. A mérések a hőkamera esetében hőmérsékletmérést jelentettek, de mértem barlangi Co2, RP, T, p adatokat is (a járat mentén mobil méréssel), és felszíni RP, T és p adatokat is (bejárat mellett, fix mérő állásban). Felhasználtam az Árpád-tető 2024-2025. évi időjárási adatokat az Abaligeti klíma bemutatására. A hőkamera Fluke TIR1 készülék, 0,01 °C érzékenységgel, belső hitelesítéssel, ami minden bekapcsoláskor aktiválódott.

1. ábra: Fluke hőkamera és hőkép a Bejáratban, és alatta egy 3D-szerű szoftveres export.

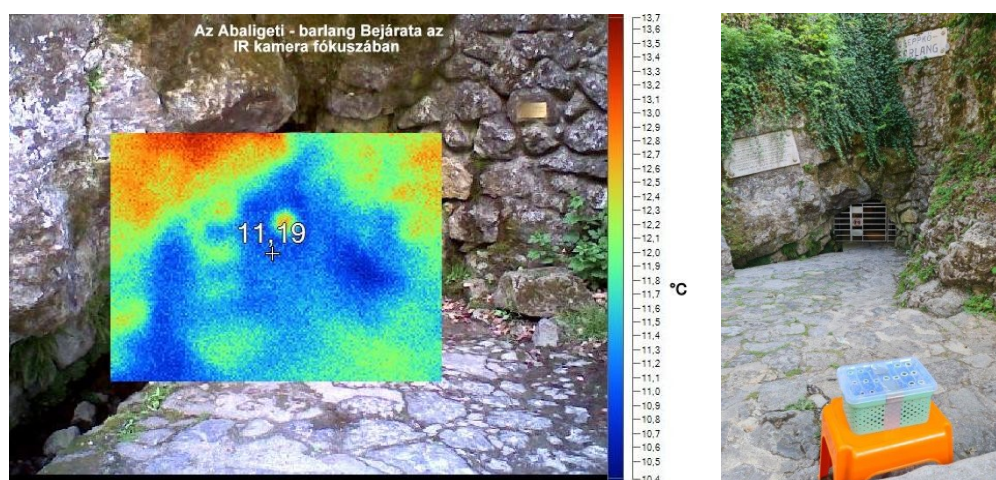


A mérést három személy kivitelezte, Miklós Gábor a projekt vezetője, Filepné Simon Gyöngyi és Kántor Petra. A bejárások a kiépített járda felület mentén történtek.

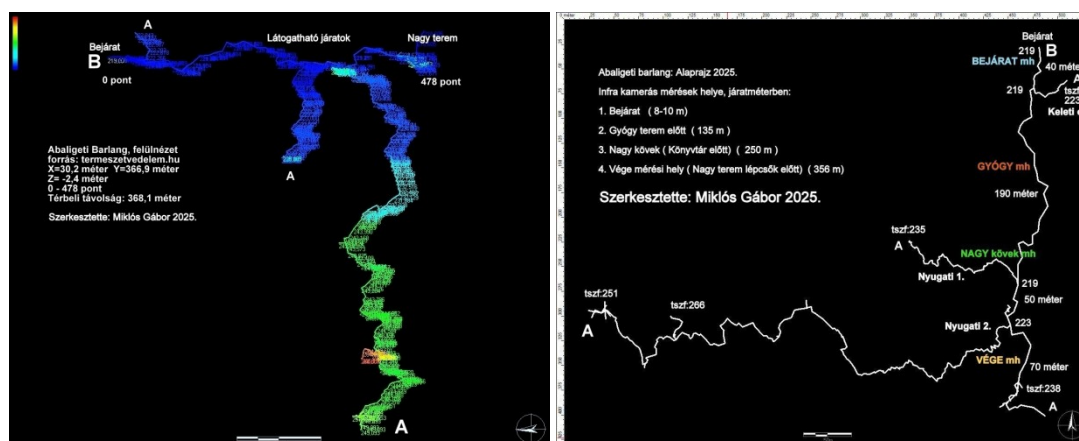
2. ábra: A méréseket végezte: Miklós Gábor, Filepné Simon Gyöngyi és Kántor Petra.



3. ábra: A Bejárat és a kiegészítő műszerek szellőző doboza, a magasságot biztosító szék.



4. ábra: Barlangszerkezet, mérési helyek kiválasztása.



Abaligeti mérési helyek és mérési feltételek:

A 4. ábrán jelöltük a B (Bejárat) és az A (egyéb bejáratok, például az Akácós-víznyelő) pontokat. Nyáron a levegő a Bejáraton kifelé, télen az Akácós-víznyelőn kifelé áramlik (5. ábra).

A mérések a főágban történtek, a Bejáratától a Nagy teremig. A mérőhelyek:

Bejárat (1.) – az első kanyar után, körülbelül 10 méternél.

Gyógy-terem (2.) – 135 méternél.

Nagy kövek (3.) – 250 méternél.

Vége (4.) – a Könyvtár után, 356 méternél.

A távolságokat a járda középvezetében mértük, a végpont 440 méter.

A mérőhelyek kiválasztásának szempontjai:

A Bejárat közvetlenül reagál a felszíni klímaváltozásokra, az első kanyarban.

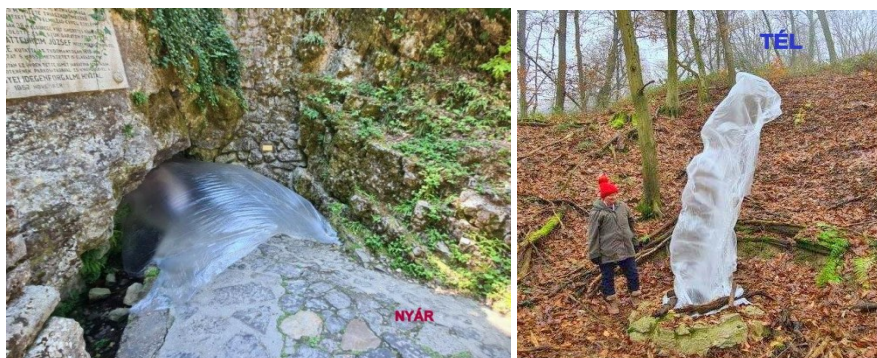
A Gyógy-terem és a Nagy kövek a Nyugati 2. leágazás előtti, téli–nyári irányváltásoknak kitett zónák.

A Vége mérőhely a Könyvtár után, kevésbé légáramlásos szakaszon található.

A 2025. évi mérések időpontja az aktuális időjárási helyzet alapján lett kijelölve, nyáron és télen nagy hőmérséklet-különbség, tavasszal és ősszel a barlangi átlaghőmérséklethez közeli értékek alapján.

Összesen négy mérőhelyen, négy évszakban, tizenhat infravörös (IR) mérés készült.

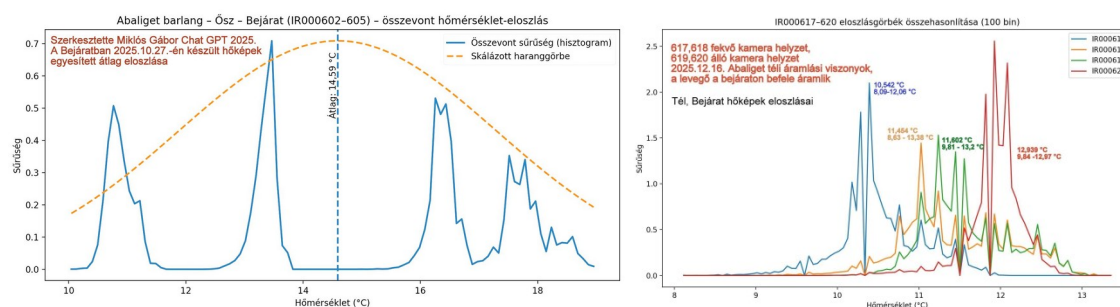
5. ábra: Nyári – téli légáramlási irányváltás, a Bejáratban és az Akácos víznyelőnél.



2. A mérések kivitelezése és statisztika

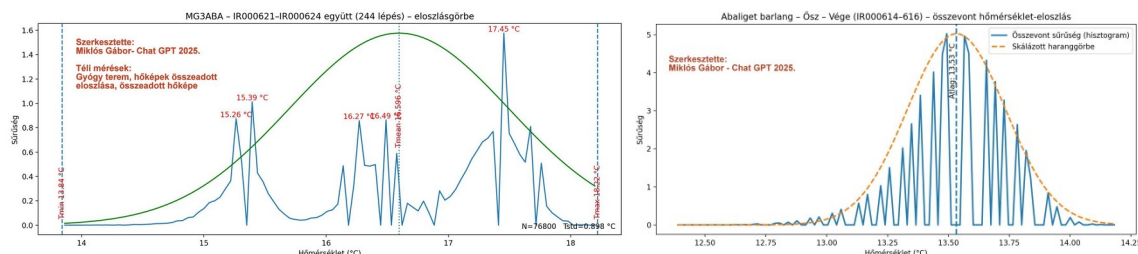
A Fluke TIR1 hőkamera 7,5 μm - 14 μm hullámhosszon érzékel, járat irányban mértünk, befele. A kamera irány-érzékeny, kis elfordítás mellett is különbségek lehetnek, valamint a szimmetrikus hőképet téglalap alakra vetíti. Ezért tipikusan 4 mérést végeztünk, 2 vízszintes téglalappal, és 2 rá merőleges függőleges állással. Chat GPT segítségével kinyerjük az információt, majd hotspot szűréssel a diszkrét meleg pontokat is. (Lámpa.) Ezután összesen eloszlást és új összesen képet szerkesztünk.

6. ábra: Bejárat -Ősz és Bejárat -Tél 4-4 kameraállás, összevont eloszlás görbéi.



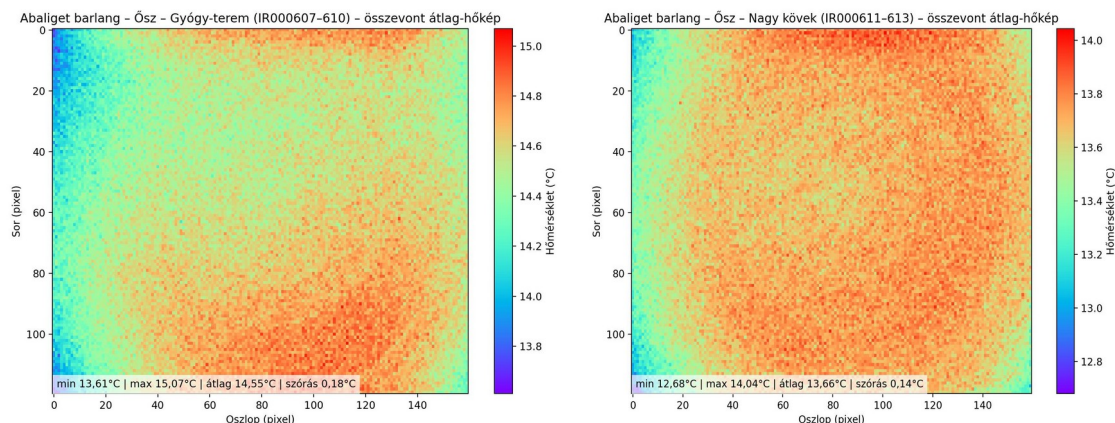
Megfigyelhető a Bejárat eloszláson, hogy az őszi időszakban cca. 10-18,5 °C tartományban, a téli időszakban 9-13 °C hőmérsékleti tartományban változik. Ősszel szélesebb a tartomány, nappal felmelegedés – éjjel erős lehűlés is lehetséges, ami inverziót, napi légáram irányváltást is okozhat.

7. ábra: Gyógy-terem Tél és Vége mérőhely Ősz eloszlás görbéi.



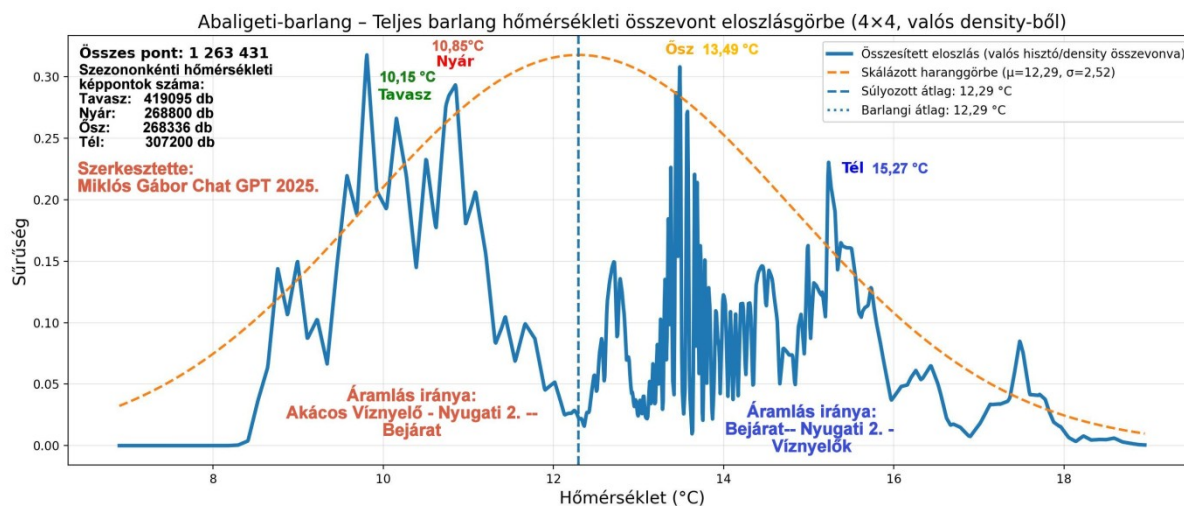
A Vége (Ősz) mérőhely hőmérsékleti tartománya sokkal szűkebb, mint a Gyógy-terem téli hőmérsékleti tartománya.

8. ábra: Példaként bemutatjuk az Őszi - Gyógy-terem és Nagy kövek összevont hőképet. (Chat GPT).



A két mérőhely nagyon hasonló, szórásuk is hasonló. A Bejárathoz közelebb eső Gyógy-terem magasabb átlaghőmérsékletű, és szélesebb a hőmérsékleti spektruma, jobban tükrözi az átmeneti időszakot, mint a beljebb lévő Nagy kövek mérőhely.

9. ábra: Az Abaligeti barlang teljes összevont eloszlásgörbéje, az évszakok megjelölésével.



Az éves és szezononkénti eloszlások összegzése nagyon szabályos képet rajzol. Az átlagos felszíni melegedés mintha végig haladna a barlangon, késéssel.

10. ábra: A hőkamerás felvételek statisztikája.

Statisztika a mérési adatokról (N + átlaghőmérséklet)

Összesített mutatók

Összes mérés (minden évszak, minden mérőhely): N = 1.263.431 db

Barlang súlyozott átlaghőmérséklet: 12,29 °C

Évszakonként : N (képpontok, hőmérséklet mérések db) és átlag T

Évszak	N (db)	Átlag T (°C)
Tavaszi	419095	10,22
Nyár	268800	12,08
Ősz	268336	14,15
Tél	307200	13,68

Mérőhelyenként: darabszámok (Tavaszi–Nyár–Ősz–Tél)

Sorszám	Mérőhely	Tavaszi N	Nyár N	Ősz N	Tél N
1	Bejárat	112273	76800	76336	76800
2	Gyógy-terem	115034	76800	76800	76800
3	Nagy-kövek	76734	38400	57600	76800
4	Vége mh.	115054	76800	57600	76800

Mérőhelyenként: átlaghőmérsékletek (Tavaszi–Nyár–Ősz–Tél)

Sorszám	Mérőhely	Tavaszi átlagT (°C)	Nyár átlagT (°C)	Ősz átlagT (°C)	Tél átlagT (°C)
1	Bejárat	11,79	15,09	14,59	11,38
2	Gyógy-terem	9,46	10,82	14,55	16,60
3	Nagy-kövek	9,04	12,75	13,66	15,34
4	Vége	10,24	10,01	13,53	11,39

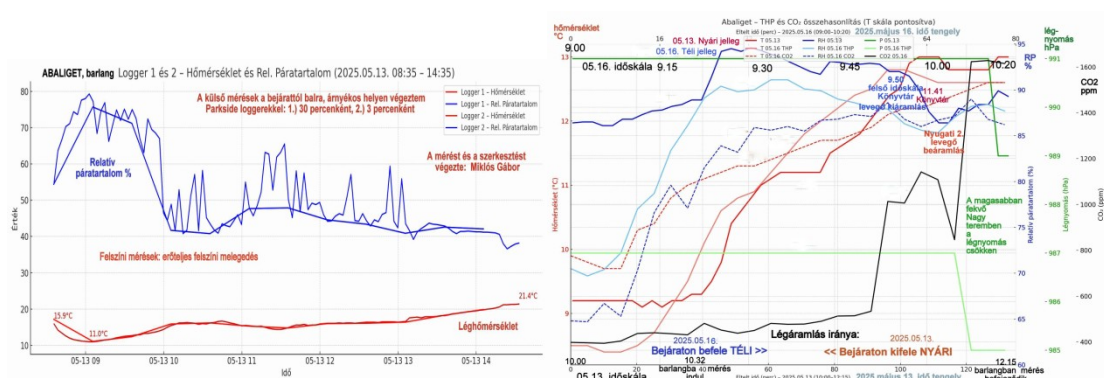
3. Évszakok szerinti elemzés

3.1 Tavasz, 2025.05.13.

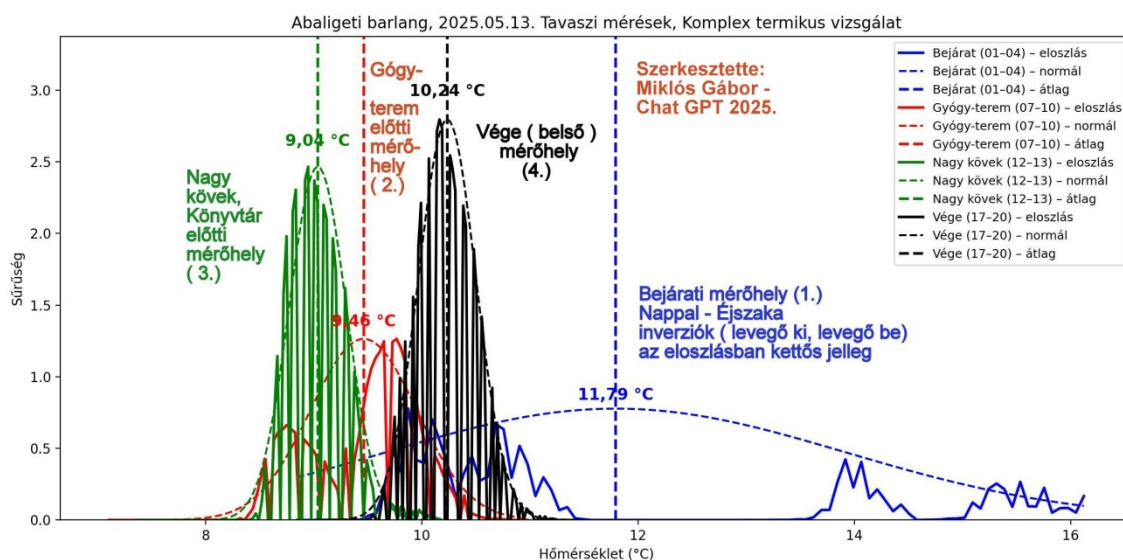
A tavaszi méréseket két alkalommal, 2025.május 13-án és 16-án végeztük. Az első napon még meglepetésünkre nyári, a barlangból kifele áramló levegővel. Ki is derült az ok, a gyors felmelegedés. A levegő hőmérséklete 15.00 körül már elérte a 20 °C –ot. Ezért mértünk 16-án újból.

Megfigyelhettük a kettős váltást. A 11. ábra jobb oldali kép együtt tartalmazza a két nap barlangi eredményeit. A Bejárat a két napon tükrözi az eltérő klímát, de a belső részek nem. A Bejáratnál az RP 13-án magasabb 87% (kifele áramlás), 16-án a friss levegő RP értéke alacsonyabb 70% (befeleg áramlás -20%). Ezzel szemben a Könyvtárnál (Nyugati 2.járat leágazás) a CO2 hirtelen csökkenése friss levegőre utal, tehát még nyári jellegre.

11. ábra: Felszíni klíma viszonyok 2025.05.13.-án és barlangi klíma viszonyok mindkét napra tehát 2025.05.16-ra is vetítve.



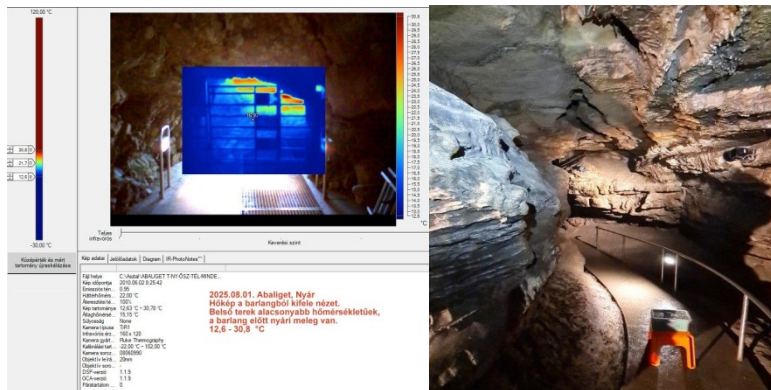
12. ábra: A tavaszi mérések hőmérsékleti eloszlásai mérőhelyenként.



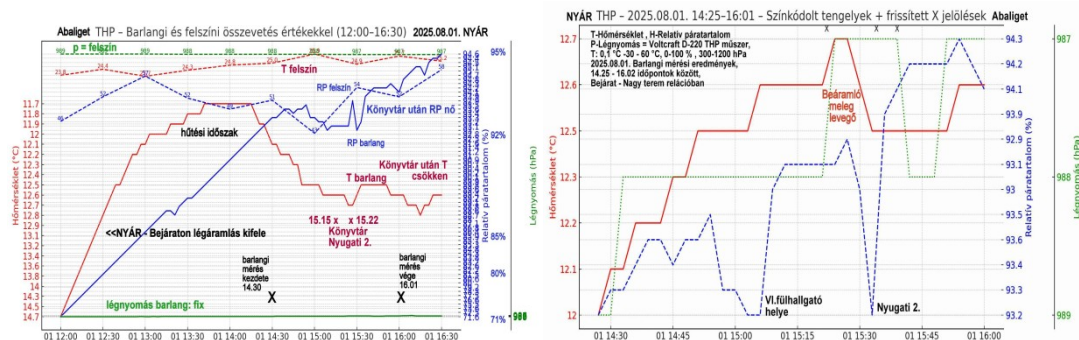
A kék színű Bejárat mérőhely kettős eloszlást mutat, magas és alacsony hőmérsékletek egyaránt láthatóak. Oka az éjjeli és nappali hőmérséklet közötti különbség, az inverz üzemmód.

3.2 Nyár, 2025.08.01.

13. ábra: Hőkép a Bejárati ajtóról, kitekintés a szabadba, klímamérő csomag a járatban. Tartomány 12,6 – 31 °C.

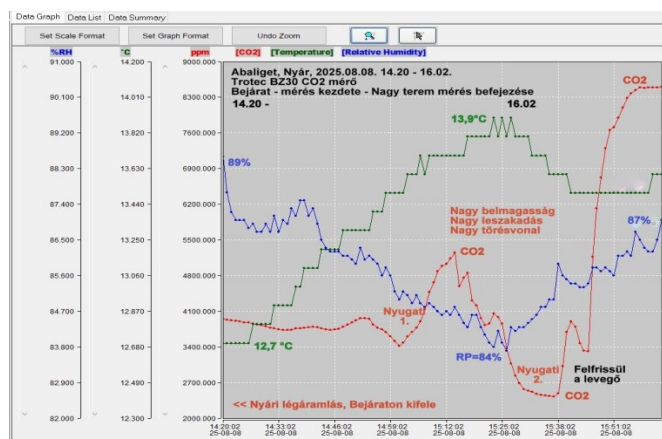


14. ábra: Balról felszíni adatok 25 °C körül, benne és külön a barlangi eredmények jobbról.



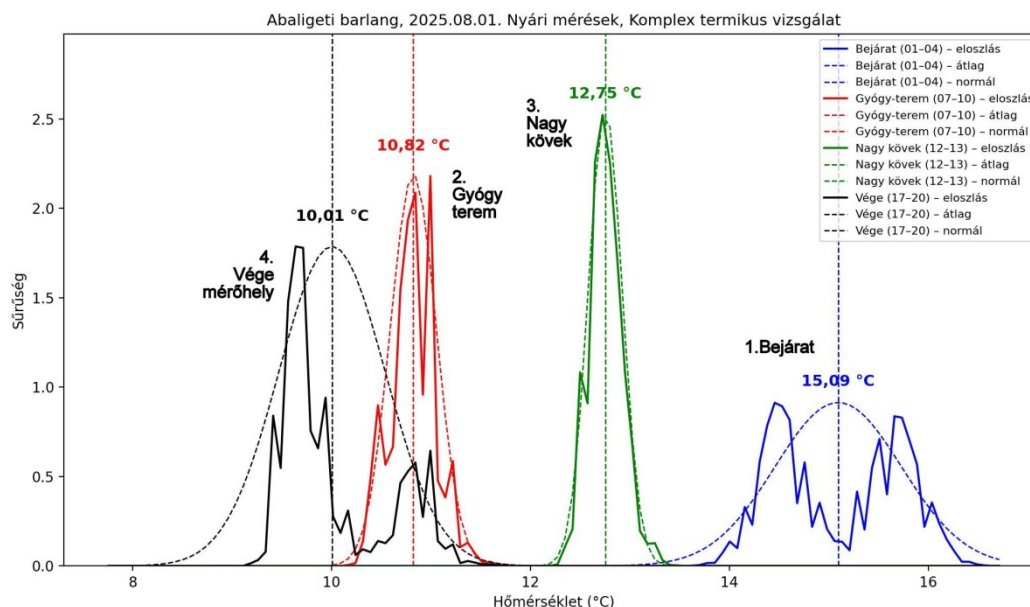
A bal oldali teljes mérési időszak jól mutatja azt a technikai részletet, hogy a műszereknek 1,5 – 2 óra lehülési idő szükséges. A barlangban is lassú menetben használjuk a mobil eszközöket és csak befele mérünk, Bejárat – Nagy terem relációban. Kifele gyors haladással nincsen elegendő ideje a műszereknek felvenni a hőmérsékletet. A jobb oldali kék relatív páratartalom adatok árulkodóak, nyári légáramlási viszony mellett a Nyugati 1. és a Nyugati 2. járatok felborítják az értékeket és mutatják a beáramlást a fő járatba. A hőmérséklet azonban csak a Nyugati 2. esetében mutat nagyobb változást, ami utal a nagyobb mennyiségre.

15. ábra: Nyári CO2 mérések a barlangban.



A 15. ábra megerősíti a Nyugat 1-2. becsatlakozó járatok hatásait. A Könyvtár után a CO₂ erősen növekszik, ami bizonyítja, hogy ezen a napon légcserre nincsen. Kérdéses, hogy a két járat között miért nő a CO₂ értéke.

16. ábra: A Nyári mérések hőmérsékleti eloszlásai.

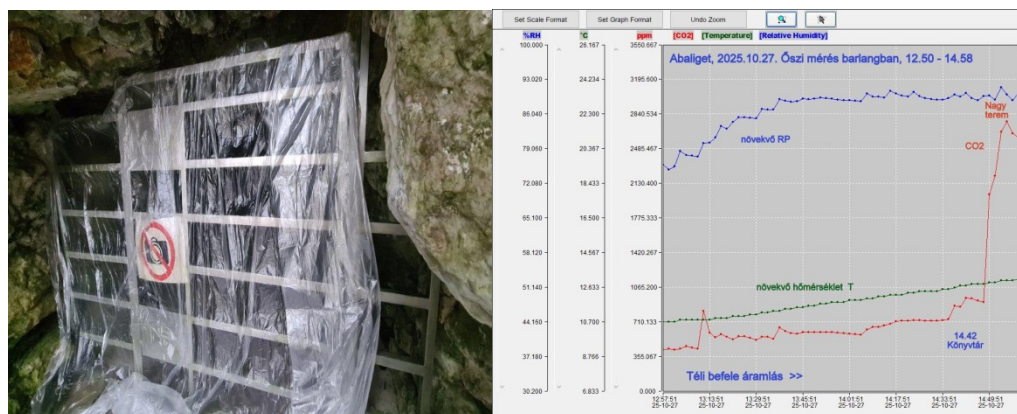


Az átlaghőmérsékletek nem evidens eredményeket mutatnak. Azt várnánk, ha nyári légáramlás van, akkor a Bejárat – Vége mérő hely között 1-2-3-4 sorrendiség van. Az eleje, vége egyezik, de a Gyógy és a Nagy kövek fordított hőmérsékleti sorrendben találhatók. Fokozatosan jutunk el a következtetésig, de ez a tapasztalat sejteti, hogy más tényezőknek is szerepe van a barlang légkörszében és energia háztartásában.

3.3 Ősz, 2025.10.27.

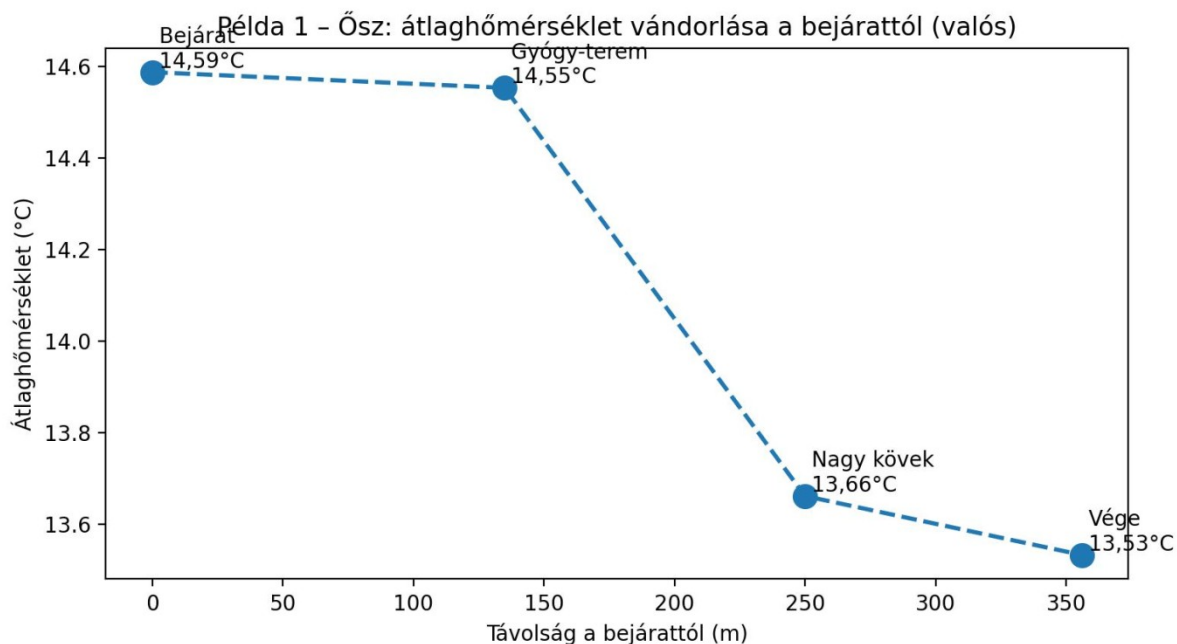
Az őszi méréseknél már téli, befele áramlás volt a Bejáratnál. A 17. ábra - foto mutatja a befele szívást, és a barlangi adatokat. A CO₂ a Könyvtárig (Nyugati 2.) egyenletesen nő, vagyis ez a szakasz még kap friss levegőt, de utána már nem járja át a levegő a szakaszt, a CO₂ ugrásszerűen nő.

17. ábra: Légáramlás megfigyelése a Bejáratban, barlangi klíma adatok.



Bemutatjuk az őszi mérések átlaghőmérsékleti görbéjét. Mérőhelyenkénti átlaghőmérséklet csökkenést látunk. (Lásd még 38. ábra)

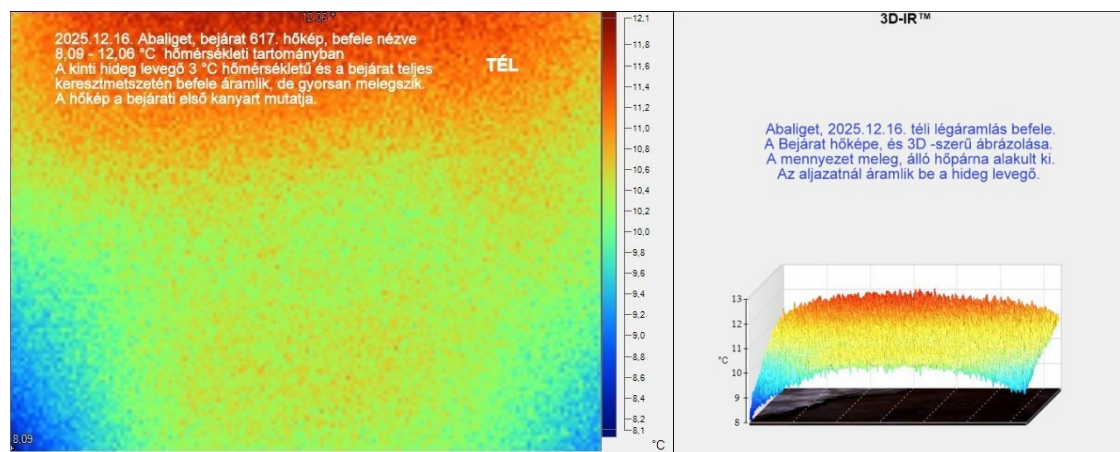
18. ábra: Az Őszi átlaghőmérsékletek változása a Bejárattól a Vége mérőhelyig.



3.4 Tél, 2025.12.16.

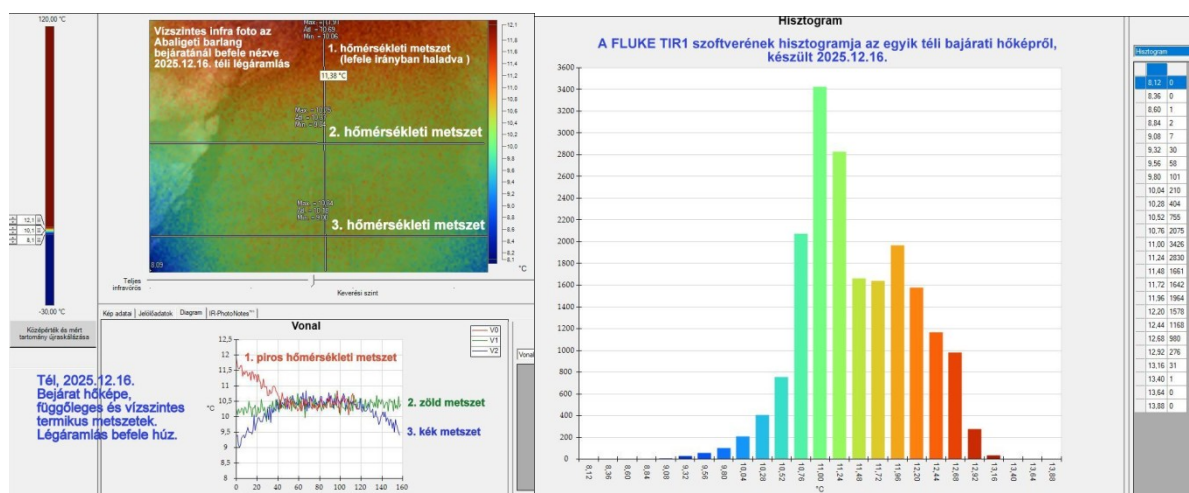
Kiemeltünk egy hőképet a téli Bejáráti mérések közül. Jól látszik alul a befele áramlás ezen a napon, és a plafonon a meleg párna, amely azonban a bejáraton nem folyik kifelé. A 3D-szerű ábra szemlélteti ennek a szerkezetét, enyhén felülnézetben.

19. ábra: Bejáráti hőkép, Tél, és 3D-szerű Fluke szoftveres megjelenítése.



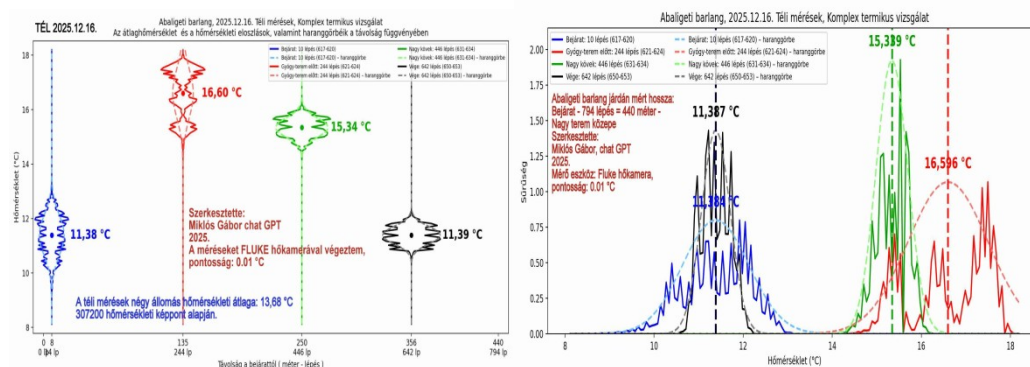
A Fluke szoftver speciális IS2 állományban dolgozik, de különböző exportok révén jpeg és txt állomány is készíthető. A képpontok egyenként egy konkrét hőmérsékleti értéket képviselnek, és lekérdezhetők, de egyenes, metszet, egyéb alakzatok mentén is lehet lekérdezni. A 20. ábrán néhány funkciót mutatunk be.

20. ábra: A Fluke hőkamera Bejárat – téli kép, metszetek és hőmérsékleti eloszlás bemutatása.



A Téli mérések (21. ábra) hőmérsékleti eloszlásait kétféle módon mutatjuk be. A fésűs ábra a vertikális amplitúdója alapján azt mutatja, hogy az első két mérőhely (Bejárat, Gyógy) szélesebb hőmérsékleti tartományban mozog, mint a két belső (Nagy kövek, Vége mérőhely). Továbbá a Bejárat alacsonyabb hőmérsékletű, de a Gyógy teremről az átlaghőmérsékletek csökkennek. A jobb oldali ábra kiemeli, hogy a Bejárat hőmérséklet (kék) lényegében azonos a belső Vége (fekete) mérőhely adataival. És azt is, hogy a kettő között a Gyógy és Nagy kövek egészen magas átlaghőmérsékletet mutat. Ami felveti, vajon nem működnek-e a barlangban valamilyen módon fáziskések az energia transzportban.

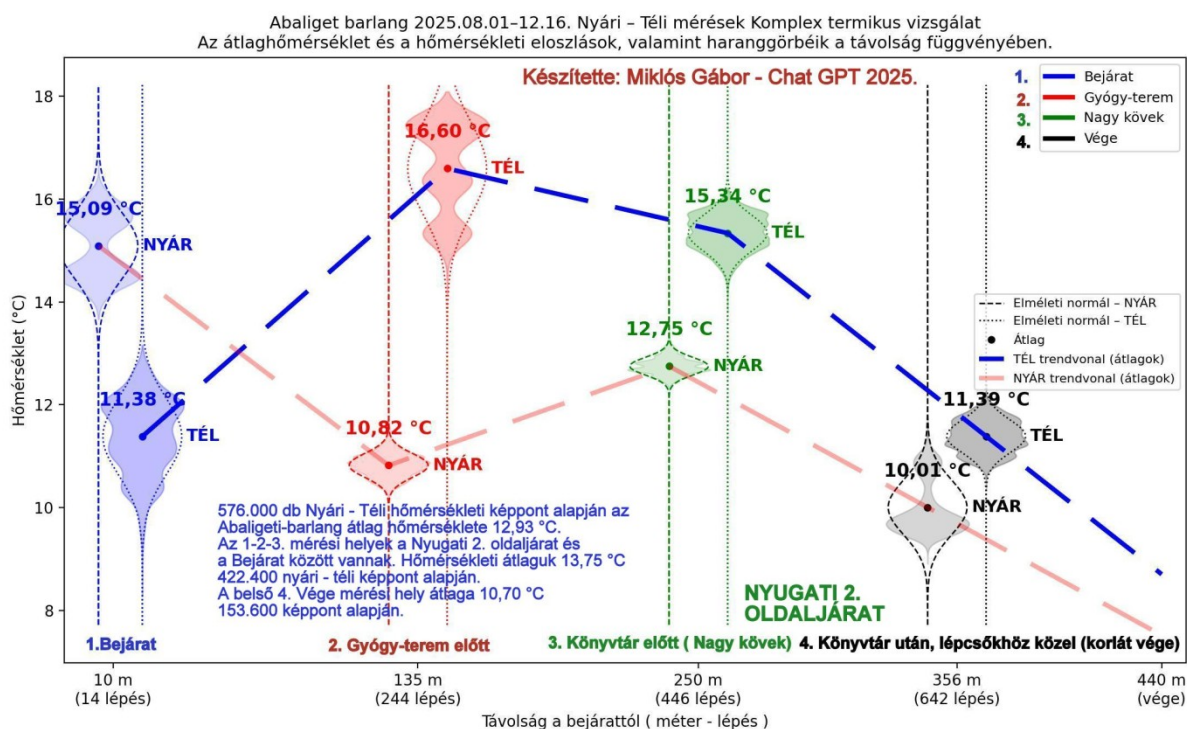
21. ábra Téli fésűs ábra, barlangi elhelyezkedéssel, valamint eloszlások és hőmérséklet másként.



Évszakok szerinti elemzés: Összefoglalás

Áttekintjük a négy évszak eredményeit. Először megvizsgáljuk a Nyár – Tél viszonyait (22. ábra). Átmeneti időszakok nélkül remélhetőleg tisztább a kép. Az ábrán lévő mérések 576.000 hőmérsékleti képpont alapján készültek. A várt teljesen ellentétes eredmények csak részben teljesülnek, ami a Nyár – Nagy kövek mérőhely magasabb átlaghőmérsékletében látszik. A naptári évhez kötött engedélyezés miatt, decemberben a méréseket el kellett végeznünk, de lehetséges, hogy egy későbbi, 2026. márciusi mérésnél már jobban simulat volna a görbe. Ami viszont egyértelműen látszik, a nyári - téli légáram irányváltás miatt a Bejárat és a Gyógy terem között a jelleggörbe keresztezi egymást.

22. ábra A Nyári – Téli mérések összehasonlítása.

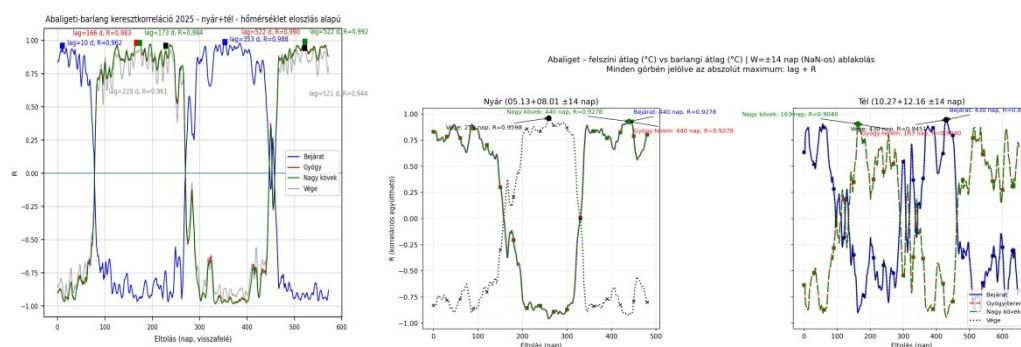


Keresztkorrelációval megvizsgáltuk, hogy a felszíni hőmérséklet-változások (Árpád-tető Pécs, 2024-2025. napi átlaghőmérsékletek) milyen fáziskéséssel jelennek meg az Abaligeti-barlang különböző mérési pontjain.

Az elemzést több változatban végeztük: - egyszerű napi átlagokkal – időben visszafele léptetett adatsorokkal – évszakonkénti átlagokkal – valamint egyes mérési helyek négy évszakai sorozataival. Emellett hőmérsékleti szimulációt (w29) is alkalmaztunk: a valós adatokból 29 napos eloszlást képeztünk, ahol a középpont a legmagasabb értékek 1/29-ed részének átlaga volt. Az eloszlás környezetében darabszám alapján fokozatosan csökkenő átlagokat számítottunk, így egy 29 napos idősor vett részt a keresztkorrelációban.

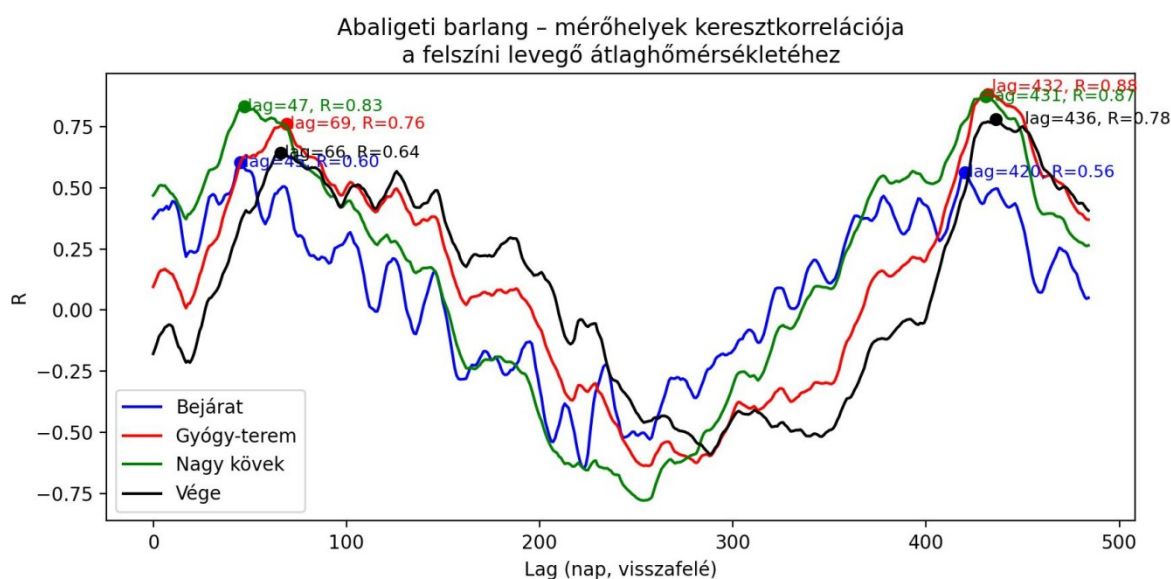
A Nyár–Tél keresztkorrelációt két változatban végeztük. A csak nyár-tél elemzés (23. ábra) szétválasztotta a Bejárat (kék) gyors reagálású és a másik három mérési hely futását, amelyek együtt haladtak. Keressük a magyarázatát annak, hogy mért van kettős maximuma a többi görbének, ráadásul úgy, hogy 520 nap körül (17 hónap, több mint egy év) abszolút maximumokat találtunk, $R(\text{Gyógy})=0,990$ és $R(\text{Nagy})=0,992$ nagyon szoros kapcsolattal. Mind az egy évnél hosszabb idő, mind az abszolút maximum új kérdést vet fel, hiszen a légáramlás éves menetrend szerint váltakozik. A külön nyár- külön tél elemzés (23.ábra-jobb) újabb részleteket tárt fel. A csak nyár görbéiben a Nagy kövek mérőhely különül el a felszínhez képest, a csak tél megerősíti a Bejárat gyors reagálást, a többi görbe együtt mozog. Ezzel keletkezett egy új vizsgálándó kérdés, mi okozza a nagy késéseket, és a magas R értékeket?

23. ábra: Keresztkorreláció: Bal: csak nyár-tél adatok együtt, Jobb: nyár és tél adatok külön.



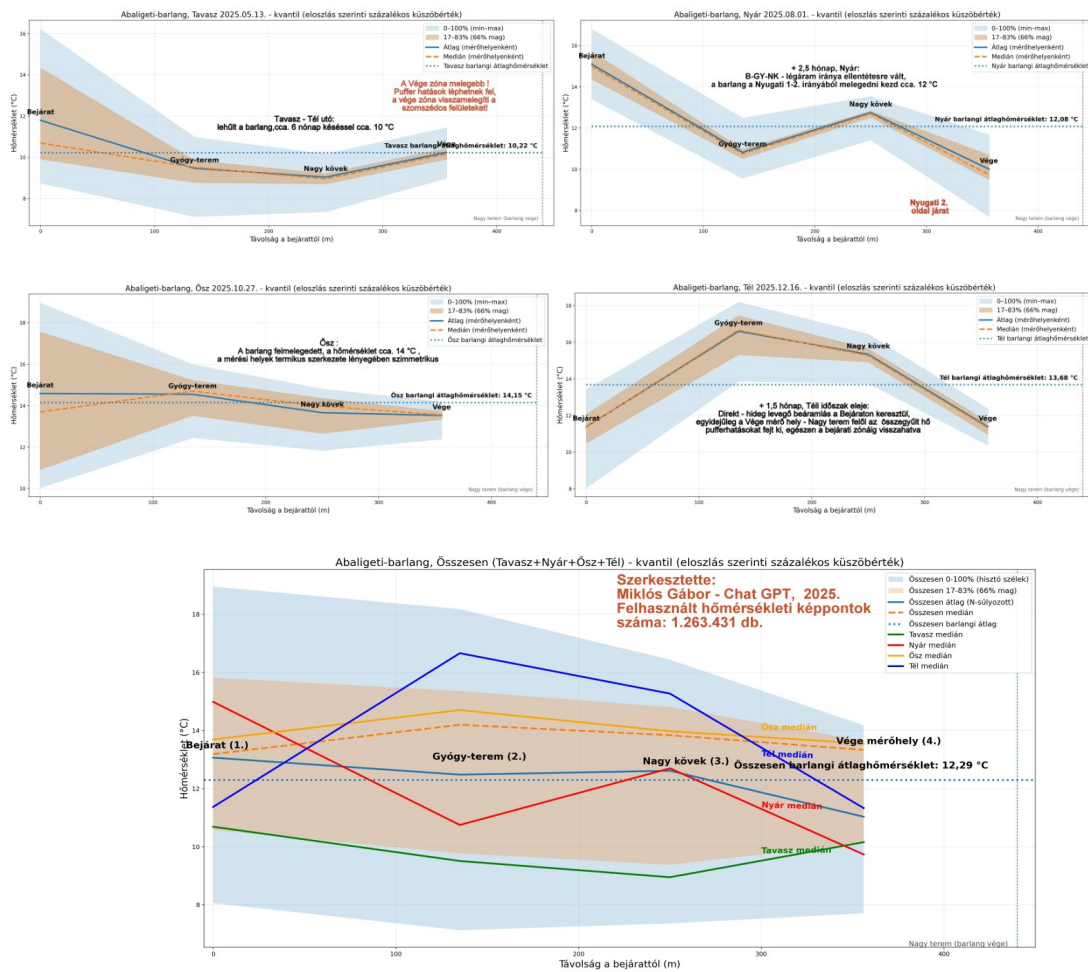
Ha az összes mérőhely keresztkorrelációját megnézzük, (mérőhelyenként Tavasz-Nyár-Ősz-Tél) akkor a korrelogramok párhuzamosan futnak (24.ábra). Gyors reakció 45 – 69 nap után, $R = 0,6 - 0,83$ között. Itt is látjuk, a kései magasabb értékeket, késleltetett reakció 420-436 nap között, $R = 0,78-0,88$ értékekkel. A Bejárat elkülönül, ugyanis 45 napnál abszolút maximuma van. Felmerül, hogy a most felfedezett anomália valamilyen puffert hatás, szeretnénk igazolni és forrását megtalálni. Hogy a feltételezés valós lehet, az onnan derült ki, hogy a megelőző 2024. év melegebb volt, átlaghőmérséklete $13,46^{\circ}\text{C}$, a 2025. év átlaghőmérséklete pedig $12,90^{\circ}\text{C}$. Ez azt jelenti, a rendszerbe többlet energia került a 2025. évhez képest, amit valamikor vissza kell adnia.

24. ábra: Négy évszakos mérések keresztkorrelációja mérési helyenként.



Vizsgáljuk meg évszakonként az Abaliget-barlangban zajló folyamatokat (25. ábra). Tavasszal még a lehűlt barlangot látjuk, a nyár folyamán megindul a Nyugat1-2. járatokon a melegebb levegő, ami a Nagy köveknél már látszik. A melegedés a nyár végéig tart. Az őszi átmenet a hullámszerűen végig vonuló melegedési – hűlési folyamatokban. A téli mérésünk a téli időszak kezdetén történt, ezért a Bejárat már reagált a lehűlésre. A barlangba befele áramlik a levegő. Az összesen ábrán itt is jól látszik a nyári – téli irányváltás. A valós hőmérsékleti értékek 66%-a található a világos barna magban, a szélső értékeket a világoskék szín mutatja. Úgy tűnik az őszi időszakban volt legszimmetrikusabb a barlang.

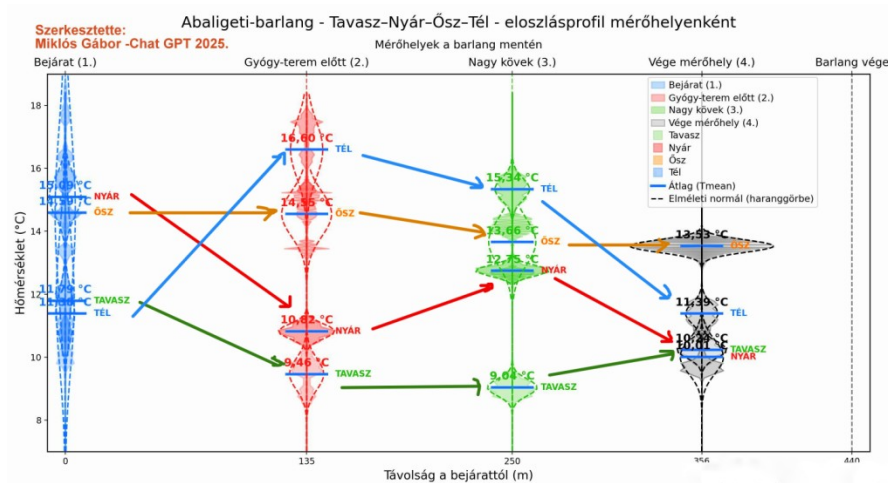
25. ábra: Évszakonkénti hőmérsékleti tartományok és az éves vetített átlagok.



4. Mérési helyek szerinti elemzés

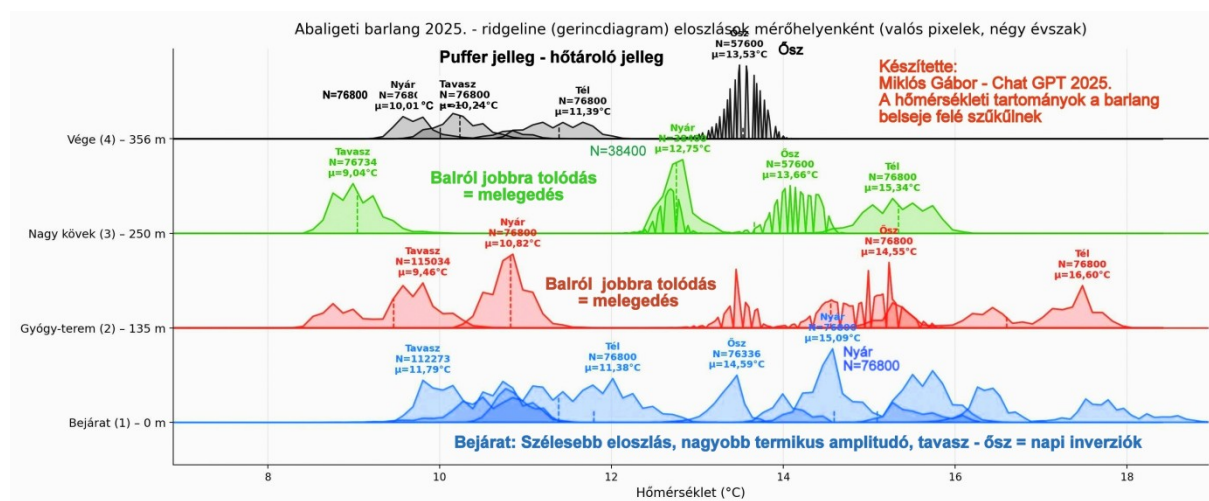
A feltételezett puffer hatások megjelennek a téli és tavaszi időszakban. Melegítés és hűtés szakaszonként, mérési helyenként eltérő késésekkel.

26. ábra: A mérési helyek átlaghőmérsékletének változásai és eloszlása.



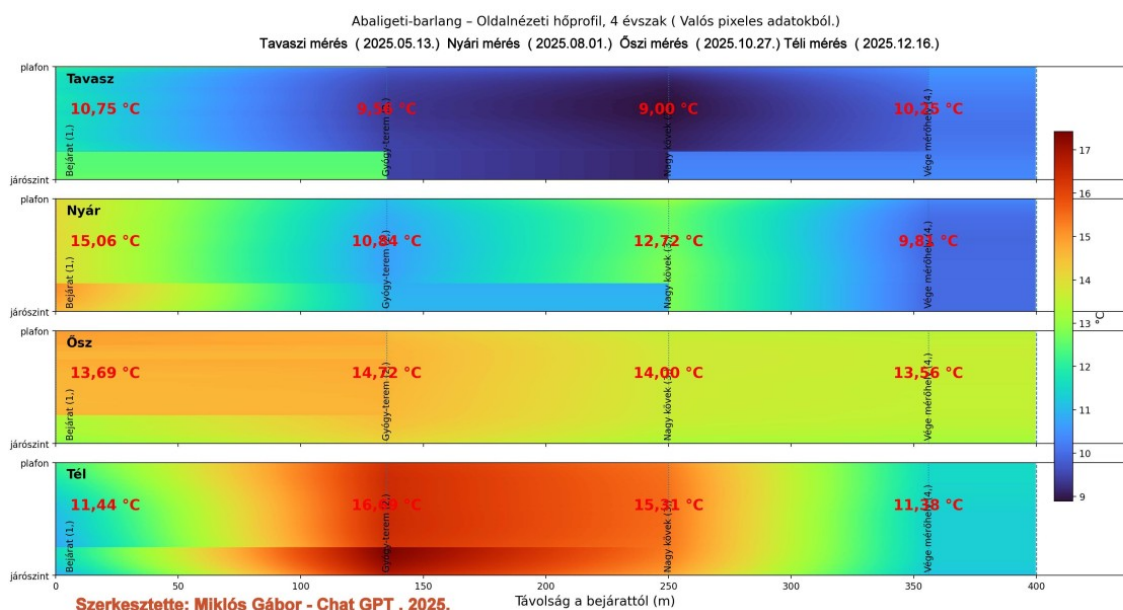
A gerincdiagram megmutatja az éves termikus struktúrát. Amíg egy-egy évszakban trapéz alakúak a hasonló gerincdiagramok (Vége felé szűkülve), addig a teljes éves Bejárat- Gyógy terem- Nagy kövek szélesebb. Rámutatva és bizonyítva, hogy a Nagy termi résznek, ha van is átmenő jellegű szellőzése, az minimális. A nyári – téli irányváltások a Bejárat, Gyógy, Nagy kövek szakaszokon jól láthatóak.

27. ábra:



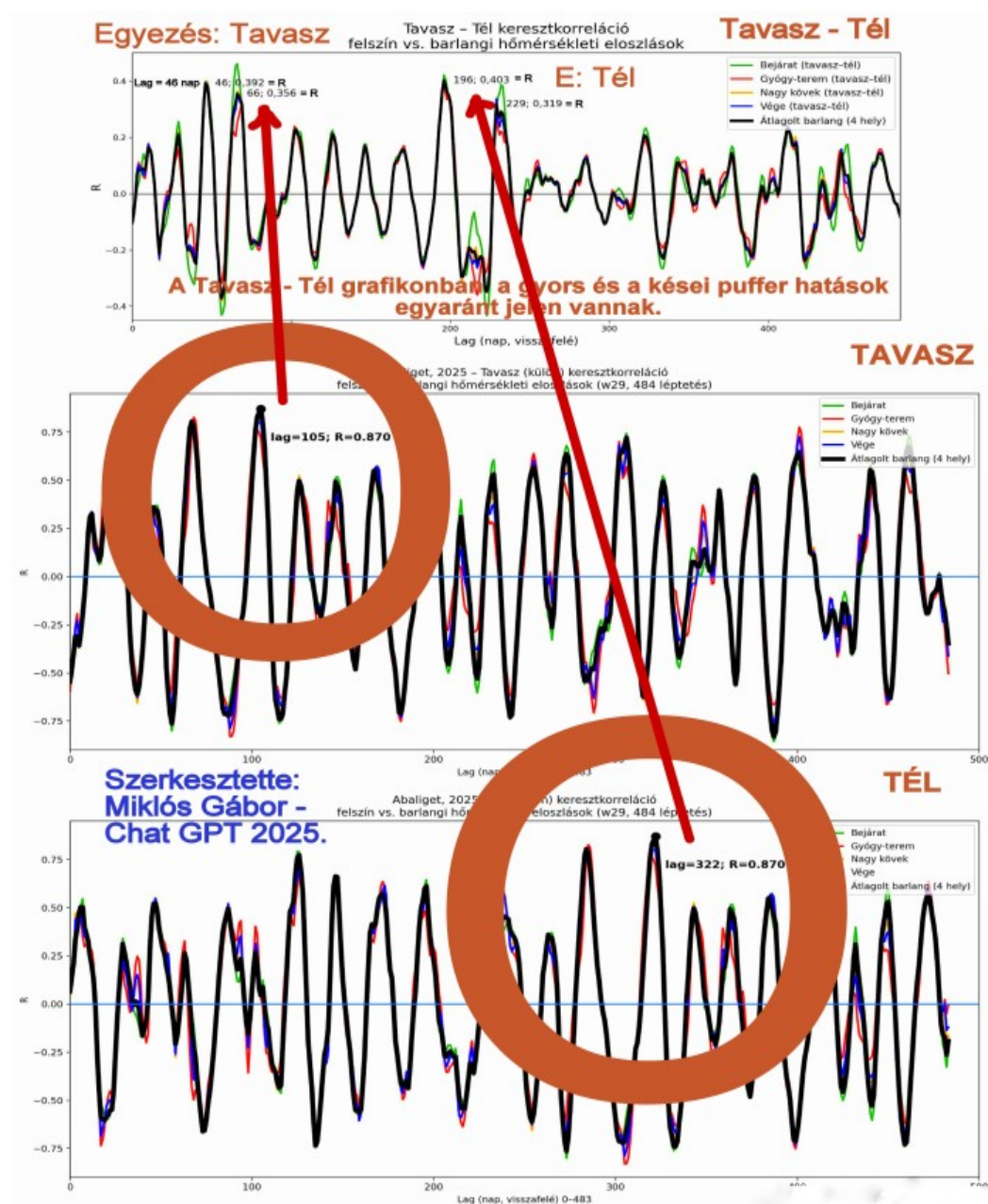
Szerettük volna szemléletessé tenni a 26. és 27. ábra tapasztalatait. A 28. ábrából kiemeljük, hogy tavasszal a Gyógy és Nagy kövek övezet ütköző zóna, ez a leghidegebb terület. A hideg még a barlangban van. Hasonlóan jól látszik, hogy a téli méréskor ugyanez az övezet még meleg. Meglepően magas átlaghőmérsékletekkel. A hőkameránk minden indításkor újra kalibrált, és a mérések során beljebb haladva ismét hűvösebbet mért, ezért mérési ponttalanság nem valószínű. A járatengely irányú mérések pedig a tükröződés esélyét minimalizálják. Az esetleges látogató hatásokat is csökkentettük, a csoportokat kerültük, illetve megvártuk a mérésekkel.

28. ábra Valós hőmérsékleti adatok vetítése hőképre 1.263.431 képpont alapján.



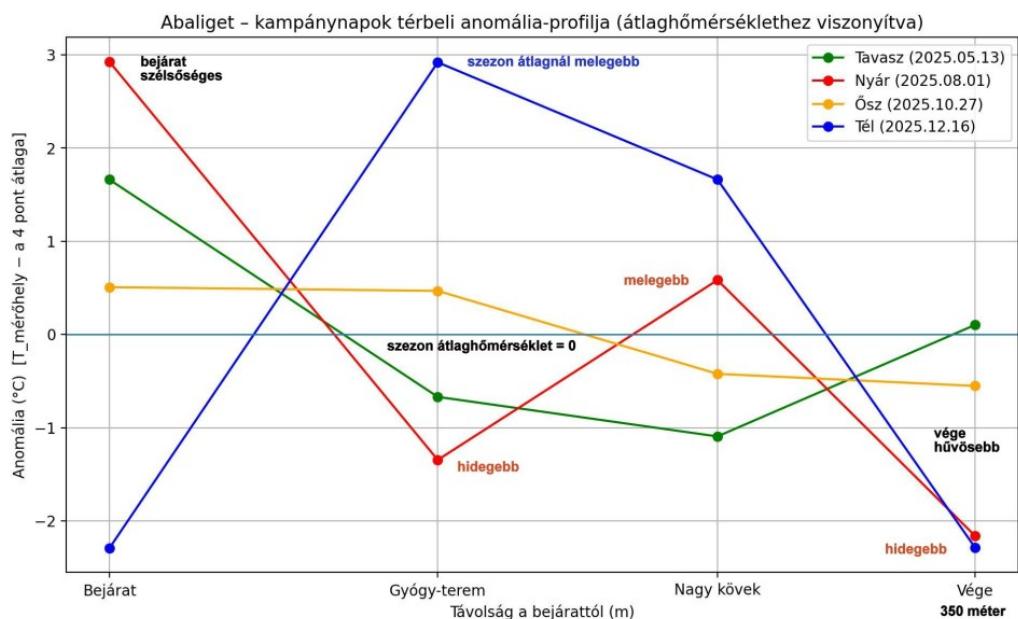
Ez az összegző hőkép felülírja a Nyár – Tél elképzelést, és indokolja a Tavasz – Tél összehasonlítást. Ezért megvizsgáltuk a Tavasz – Tél egyben, és a Tavasz külön, Tél külön keresztkorrelációt. A cél, a tavasz és a tél elkülönítése. A Tavasz – Tél egyben átlag két helyi maximumot mutat, 46 napnál és 196 napnál. Szétbontva a 29. ábrán a 2. és 3. korrelogramon látszik. A gyors hatás a tavaszhoz kötődik 105 napra (3 hó) jelentkezik, a kései hatás a téli ábrához 322 naphoz (11 hó) köthető. Ezért utóbbi valószínűleg nem közvetlenül felszíni hatás, hanem a barlang belsőből érkezik. Tetten értük a feltételezett puffer hatást.

29. ábra: Puffer hatás forrásának keresése Tavasz – Tél keresztkorrelációval.



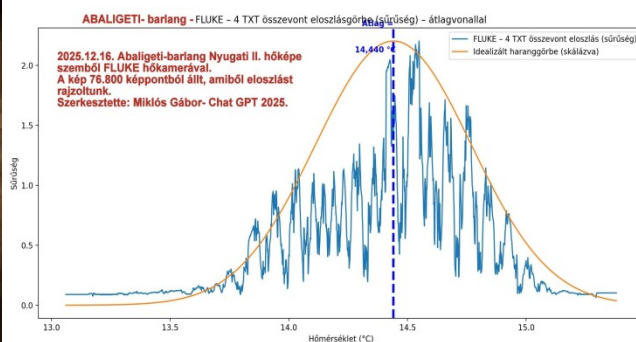
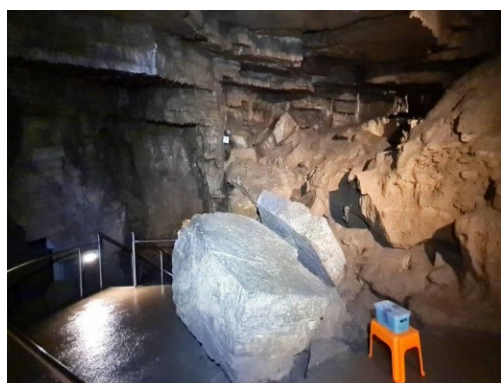
Az anomália hőmérsékleti profil (30. ábra) az átlaghőmérséklethez viszonyít, ami a grafikonon a nulla értéket jelenti. Megmaradt a nyári piros törés a Nagy kövek mérőhelyen, ezért a szomszédos Vége mérőhely – Nagy terem övezet a gyanúsítottunk, mint puffer tartály. Ami úgy működik, ha a szomszédos Nagy kövek mérőhely hidegebb, akkor melegíti, ha melegebb, akkor hűti. És feltételezhető, hogy más övezetek között is hasonlók működnek. Mivel tudunk a 2024. évi melegebb évről, ezért a többlet a 2025. évben jelent meg. Ezzel a szemléltetéssel helyére került a tavasz és az őszi átmenet, a téli kék és a nyári piros vonalak közé. Ahogyan e vonalak metszése is a Bejárat és a Gyógy terem között félúton.

30. ábra: Az Abaliget-i mérési helyek hőmérsékleti anomália profilja.



Többször említettük a Nyugati 2. oldaljáratot, ami hőkamera szempontjából nem volt mérési helyünk. Szembe nézve látjuk a 31. ábrán, hogy asszimmetrikus szerkezetű a hőmérsékleti eloszlás.

31. ábra: A fénykép a Nyugati 2. bejáratára néz, jobb oldalon az itt készült hőkép eloszlást látjuk.



5. ΔT és ΔR , a hőmérsékleti különbségek és a korrelációs különbségek vizsgálata

Eddig minden felszíni - barlangi hőmérséklet közötti keresztkorreláció megtartotta az eredeti görbék jellegét. Keressük azt az elemzési módszert, ami képes szétválasztani az egyedi- többiek, vagy egyedi- egyedi kölcsönhatásokat. Az egyik fő szétválasztási szempont a légáramlásnak közvetlenül kitett Bejárat – Gyógy – Nagy kövek együttes leválasztása a Vége mérőhelytől, de egyenként is érdekel bennünket a Bejárat – Vége, Gyógy – Vége, Nagy kövek – Vége kölcsönhatás. Amiben megmarad a felszínhez hasonlítás, mint alap. Olyan módszerre van szükségünk a lokalizáláshoz, ami az átlaghoz képesti (0 érték) pluszt és mínuszt mutatja meg, vagy a -benne van és -nélküle különbségeket. Már van konkrét feltételezésünk, az hogy a Vége – Nagy terem pufferként működik, amit a felvázolt keresztkorrelációkkal szeretnénk kimutatni. Az alábbi keresztkorrelációs eljárásokat használjuk:

1 Huzatos zóna átlaghőmérséklete

Időpontonként (vagy w29-indexenként):

- 3-helyes huzatos átlag

$$T_3(t) = \frac{B(t) + G(t) + N(t)}{3}$$

- 4-helyes huzatos+Vége átlag

$$T_4(t) = \frac{B(t) + G(t) + N(t) + V(t)}{4}$$

(Ez az egyetlen hely, ahol „átlag” van.)

2 ΔT számítás

$$\Delta T(t) = T_4(t) - T_3(t)$$

Mit jelent a ΔT előjele

- $\Delta T > 0 \rightarrow$ a Vége melegít (puffer, hőtárolás)
- $\Delta T < 0 \rightarrow$ a Vége hűt
- $\Delta T \approx 0 \rightarrow$ a Vége nem hat mérhetően

Bejárat DT = Bejárat - Vége
Gyógy DT = Gyógy - Vége
Nagy kövek = Nagy - Vége

Helyes ΔR -értelmezés, a belső részek (Vége - Nagy terem) hőtároló hatásai

A huzatos helyek felszínhez való csatolását méri a Végéhez viszonyítva.

Bejárat: Delta R bejárat
Gyógy: Delta R gyógy
Nagy kövek: Delta R nagy
(Három görbe!)

Definíció

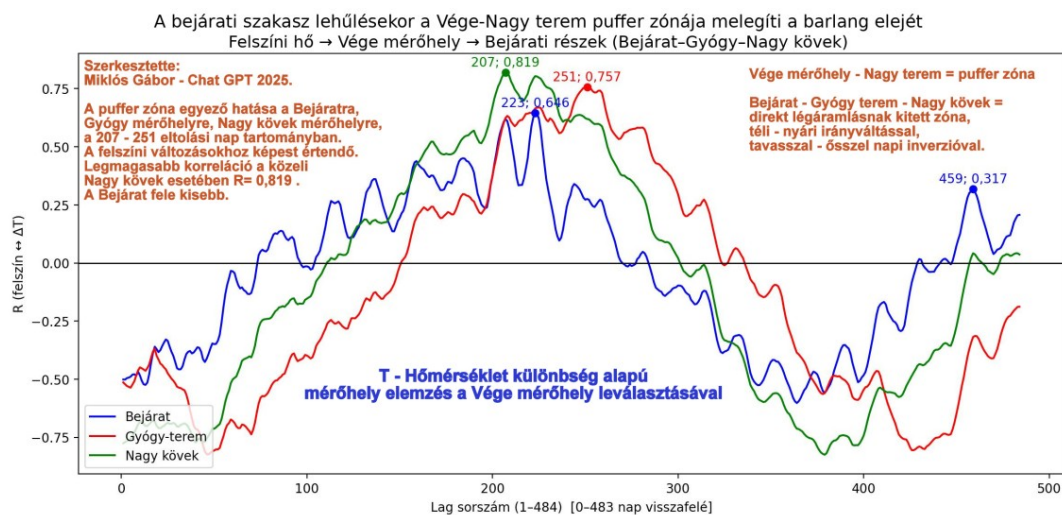
$$\Delta R_i(lag) = R_i(lag) - R_{Vége}(lag)$$

ahol:

- i = Bejárat, Gyógy, Nagy
 - **azonos lag**, azonos w29, azonos N
- R: Korrelációs együttható
- A Vége mh. Nagy terem puffer hatásai:
Ha Delta R > 0 korrelációs többlet, melegítés
Ha Delta R < 0 korrelációs hiány, többlet hűtés

Eddigi ismereteink szerint az Abaligeti-barlang egy a Nap energia által vezérelt rendszer, aminek ezért domináns tényezője a melegítés. Nyáron felmelegszik, télen lehül. A barlang levegője, a patak vize hordozza az energiát (gyorsabb), a kőzet pedig egy végtelen nagy kapacitású hőtárolóként működik (lassabb). Ezért fő szabály szerint éves ciklussal működik, de szükségszerűen egy – egy melegebb, vagy hidegebb év érzeteti hatását. Ha a melegedés a Vége – Nagy terem zónát érinti, akkor nyáron a Nyugati 2. levegő beérkezés után elágazik, a Bejárat irányába és a Vége mérőhely irányába. Folyik a puffer feltöltődése. A 32. ábra a ΔT keresztkorrelációval szétválasztja a Vége mérőhely és egyenként a Bejárat, Gyógy terem és Nagy kövek mérőhely közötti kapcsolatot. Megmutatja, hogy mindhárom szoros kapcsolatban van a Vége mérőhellyel, és a felszínhez képest az energia, hatás - átadás 207 – 251 nap (7-8 hónap) múlva jelenik meg, nagyon szoros korrelációval. Ebben az esetben tehát a Felszín – Vége puffer – Nagy kövek – Gyógy terem – Bejárat útvonalon fejt ki hatását. Nem tudjuk, melyik mérőhely kap nagyobb energiát, (az R érték erre nem ad információt). Azt látjuk a Vége mérőhelyhez legközelebbi (zöld) Nagy kövek kap először energiát. Ezzel bizonyítottuk, hogy a Vége-Nagy terem zóna pufferként működik.

32. ábra: ΔT – keresztkorreláció a Bejárat, Gyógy, Nagy kövek kontra Vége mérőhely között.



A ΔR keresztkorrelációval egyenként megvizsgáltuk a Gyógy – Vége és a Nagy kövek - Vége mérőhelyet (33. ábra). A Gyógy teremre az eredmény szerint – áttéteket feltételezve- folyamatosan fejt ki hatást a puffer. A szomszédos Nagy kövek mérőhelyre erőteljesen, de pulzációval. A helyi maximumok melegítést a 400 feletti nagy csökkenés hűtést jelent.

33. ábra ΔR Keresztkorreláció Gyógy terem - Vége, Nagy kövek – Vége mérőhely adatai között.



A ΔT előjeles keresztkorreláció alapján (34. ábra) mérőhelyenként vizsgálható, hogyan reagálnak a barlangi zónák a felszíni hőmérséklet-változásokra.

A Vége mérőhely feltöltődése az 50–150 napos késés ideje alatt zajlik, amikor a felszín felől, főként a Nyugati 2. útvonalon keresztül energiát vesz fel. Ez felel meg az első hőpulzációnak (Pulzáció 1.).

A Pulzáció 2–3. szakaszaiban a Vége már hőt ad le a szomszédos zónáknak, elsősorban a Nagy kövek irányába. Érdekes, hogy ugyanezen időben (~300 nap körül) a Bejárat, Gyógy és Nagy kövek ΔT -je negatívvá válik, ami azt jelzi, hogy energiát vesznek fel – nem közvetlenül a felszínről, hanem belső, áttételes puffer kapcsolatokon keresztül.

Itt jelenik meg először a feltételezésünk, hogy a puffer hatás több forrásból is érkezik. A 250 nap körüli, túszerű negatív ΔT -ugrás a Gyógy és Nagy kövek esetében valószínűleg a Nyugat 1. pufferzóna hatását tükrözi.

Bár az 1–2–3. mérőhelyek (Bejárat, Gyógy, Nagy kövek) mind légáramlásnak kitett állomások, a Bejárat kiemelkedik közülük: ott a gyors, direkt felszíni hatások dominálnak.

A Vége–Nagy terem tehát hőtartályként működik, amelynek termikus menetrendje a következő:

→ feltöltődés → melegítés → hűtés → újratöltődés.

A Bejárat–Gyógy–Nagy kövek csoportja ezzel szemben az éves légáramlási irányváltásokban játszik fő szerepet: energia-cseréjük folyamatos, napi szinten is megvalósulhat, attól függően, hogy az adott pillanatban melegítenek vagy hűtenek. A Gyógy terem és a Nagy kövek viselkedése különösen érdekes: mindkettő pufferként, vagy más szóval termikus csillapítóként működik, termikus oszcillátorként kiegyenlítve a hőmérséklet-ingadozásokat. A Gyógy terem, közelebb a bejáratához, szélesebb éves hőmérsékleti tartománnyal reagál, míg a Nagy kövek szűkebb amplitúdójú, stabilabb viselkedést mutat.

A Vége mérőhely éves ciklusa ezzel szemben a lemerüléshez köthető: a 0–365 napos szakasz a feltöltődés kezdetétől a hőenergia kimerüléséig tart, majd az új feltöltődési ciklus ismét elindul.

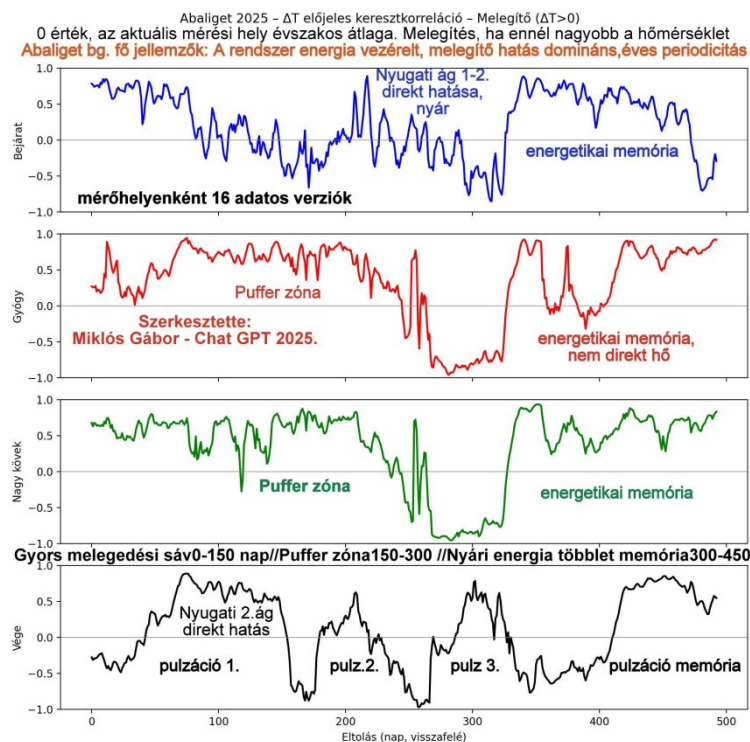
Összefoglalva, a keresztkorrelációk alapján:

Gyors reakciók: 0–150 nap → direkt felszíni energiahatás,

Kései reakciók: 300–450 nap → puffer visszacsatolás,

ami bizonyítja, hogy az Abaliget-barlang egyszerre gyorsan reagáló és késleltetve válaszoló rendszer.

34. ábra: ΔT keresztkorreláció felszín –kontra légáramnak kitett- kontra Vége mérési hely között.



A ΔR korrelációs többlet – a puffer hatások irányai és késései. (35. ábra)

A ΔR - korrelációs többlet vizsgálata ad választ a még nyitott kérdésekre. Itt nem az eltolási napok száma vagy az abszolút R-értékek a meghatározóak, hanem az, hogy elkülöníthetők-e a mérőhelyek egymástól a viselkedésük alapján.

A vizsgálat során ismét külön választottuk a Vége mérőhelyet, és összehasonlítottuk annak R-értékeit a Bejárat–Gyógy–Nagy kövek adataival. Ez tulajdonképpen „dupla korrelációs” megközelítés, amely nemcsak a felszín–barlang viszonyt, hanem a barlangon belüli energiaátadási kapcsolatokat is feltárja. Az eredmények egyértelműek és beszédesek:

a Vége–Nagy terem pufferzóna mindhárom előtte elhelyezkedő mérőhelynek energiát juttat, feltehetően többlépcsős, áttételes folyamatokon keresztül. A hőenergia terjedése nem egyszerre, hanem fokozatosan történik a térben, ami jól tükrözi a pufferzóna és a járatrendszer eltérő termikus tehetetlenségét.

A kimutatott időkésségek a felszínhez viszonyítva a következők:

Nagy kövek: ≈ 232 nap (≈ 8 hónap) – elsőként kapja a Vége felől érkező hő-betáplálást,

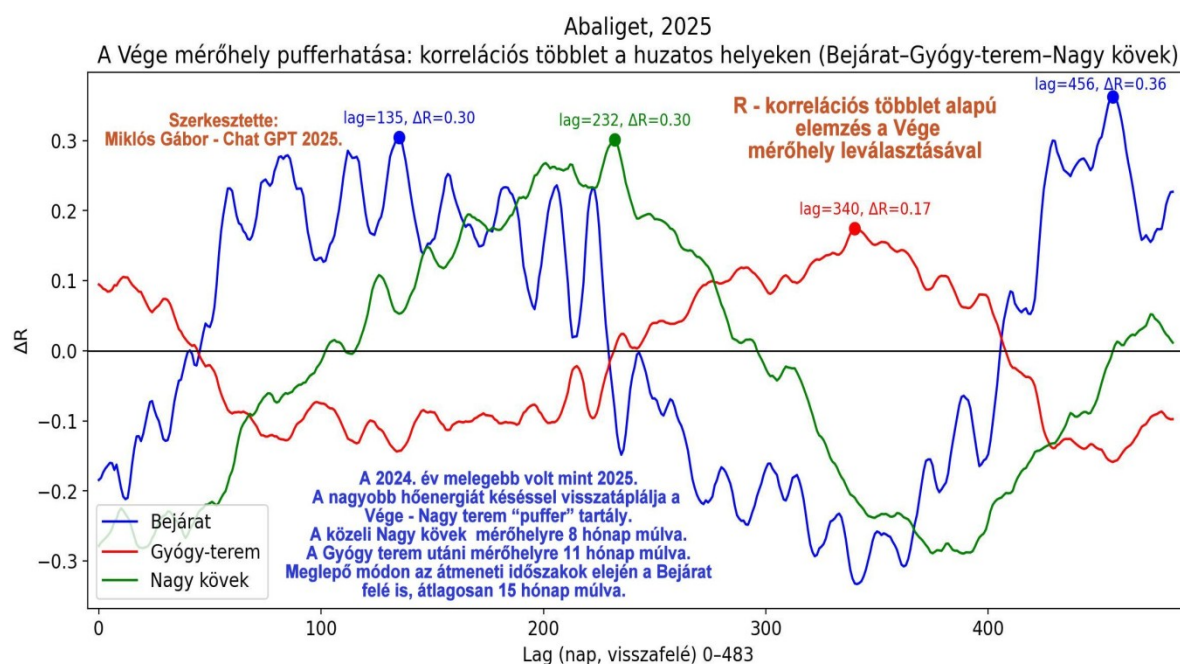
Gyógy-terem: ≈ 340 nap (≈ 11 hónap) – már kései, közvetett visszahatás,

Bejárat: ≈ 456 nap (≈ 15 hónap) – a tavaszi időszak végén jelentkező késleltetett melegedés, amikor a barlang belsejében még a téli lehűlés utóhatásai érvényesülnek.

Ez a sorrend azt bizonyítja, hogy az Abaligeti-barlang belső energiaáramlása nem egyirányú, hanem időben rétegzett, és a Vége-zóna puffer fokozatosan „visszatölti” a felszínhez közelebb eső zónákat – akár egy teljes éves cikluskéséssel.

A Gyógy termi kisebb ΔR utalhat a Nyugati 1. eltérő hatására.

35. ábra A Vége – Nagy termi puffer hatások kimutatás ΔR többlet differenciálással.



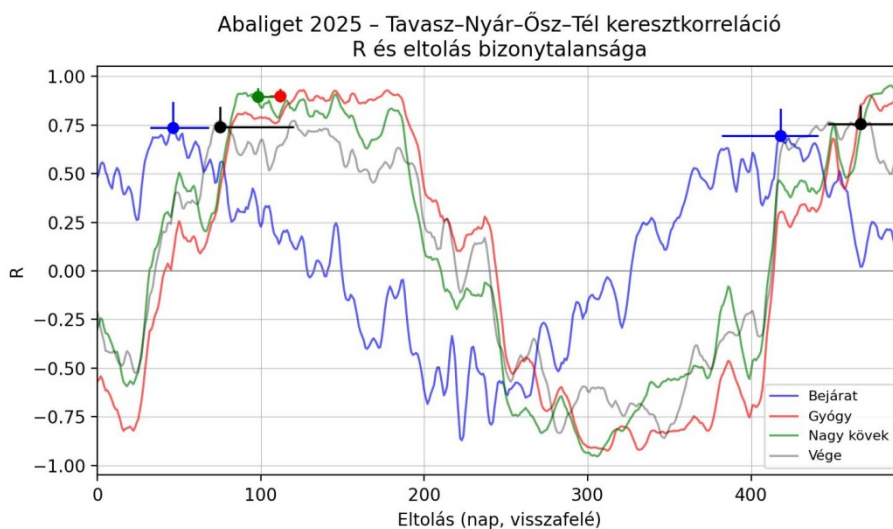
Megvizsgáltuk az R értékek és az eltolási napok bizonytalanságát.

Ennek abszolút értékben is jelentősége van, és görbe platók estében is. A görbe platóknál végül azért kisebb a jelentősége, mert annak korrekció esetén hullámszáma is hasonló lehet, így a helyi maximum sem változik. Az értékek bizonytalansága:

R: esetén 13 – 20% között váltakoznak. Ami kicsinek nevezhető.

Lag: esetén: 20-27 % , ami viszont nagy, a Bejárat – Nagy kövek szakaszra terjed ki elsősorban.

36. ábra: A keresztkorrelációk R és Lag értékeinek bizonytalansága.

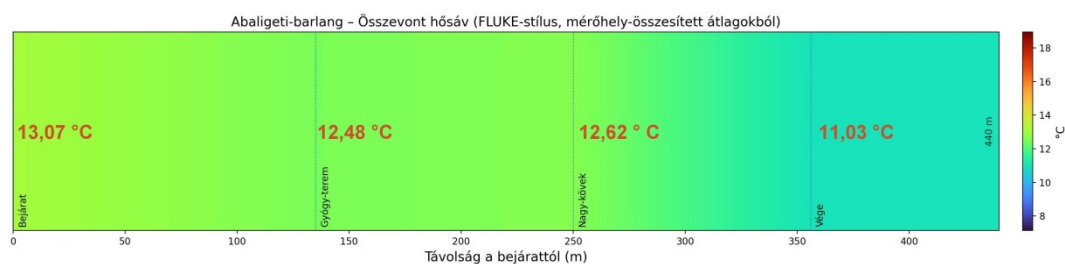


6. Összefoglalás az Abaligeti-barlang Infra mérésekről, 2025.

A teljes járat keresztmetszeti mérések összesítésével, 1.263.431 hőmérsékleti képpont alapján, a négy évszakos - négy mérőhelyes mérések átlagaként (tehát 16 mérési sorozat alapján) **az Abaligeti-barlang átlaghőmérséklete (9. ábra) 12,29 °C.**

Mérőhelyenként is meghatároztuk az átlaghőmérsékletet (37. ábra), amelyet egy infra képen mutatunk be. A légáramnak kitett mérőhelyek (1-2-3.) átlaghőmérséklete magasabb, mint a belső mérőhely átlaga. Ezen belül a középső két mérőhely (Gyógy – Nagy kövek) átlag hőmérséklete kiemelkedik. Mivel a magas értékek forrása részben lehet a Nyugati 1. puffer is, feltételezve, hogy az ismertnél nagyobb járatrendszer van mögötte, javasoljuk ennek kutatását.

37. ábra: Mérőhelyenkénti átlaghőmérsékletek bemutatása hőképen.



Direkt Hőhatás – Puffer Hőtárolás az Abaligeti-barlangban:

A barlangi mérőhelyek hőmérsékleti keresztkorrelációja (24. ábra) azt mutatja, hogy a barlangi klíma gyorsan reagál a felszíni hőmérsékletváltozásokra.

Az átlagos reakcióidő 45–69 nap (≈ 2 hónap), ami a direkt, rövid távú hőhatásokra utal.

A késleltetett, másodlagos reakció ezzel szemben a Vége–Nagy terem pufferzónához köthető.

Ezen a szakaszon a 2024. évi hőtöbblet is kimutatható a korrelációs R-értékekből, ami az ún. „puffer memória” jelenségét támasztja alá.

Ennek reakcióideje 420–436 nap (≈ 14 hónap), tehát több mint egyéves késleltetés figyelhető meg.

A mérőhelyek közvetlen környezete is rendelkezik helyi hőkiegyenlítő szereppel, de ez különösen erős a Gyógy-terem és Nagy-terem térségében, ahol a hőmozgások részben kiegyenlítődnek, részben elraktározódnak.

A ΔT és ΔR elemzések együttes értelmezése szerint az Abaligeti-barlang energiatárolása nem kizárólag a Nagy-terem domináns terére korlátozódik: a Nyugati 1-2. járatok, valamint a hozzájuk tartozó közettömeg is részt vesz a hőenergia késleltetésében és tárolásában.

Ugyanakkor ez a három pufferzóna nem azonos kategória:

- a Vége-zóna közvetlen termikus kapcsolatban áll a fő légterekkel,
- míg a Nyugati 1–2. járatok szűkebb, részben különböző, részben gyengébben szellőző rendszerek, ezért kisebb energiát képesek mozgatni a fő járatba.

Az eleje és vége lokális maximumok között ~12 hónap a különbség, ami egyértelmű éves ciklikusságra utal.

A ΔT és ΔR többletek alapján a teljes hőenergia-forgalom 2025-ben az alábbi arányban oszlik meg:

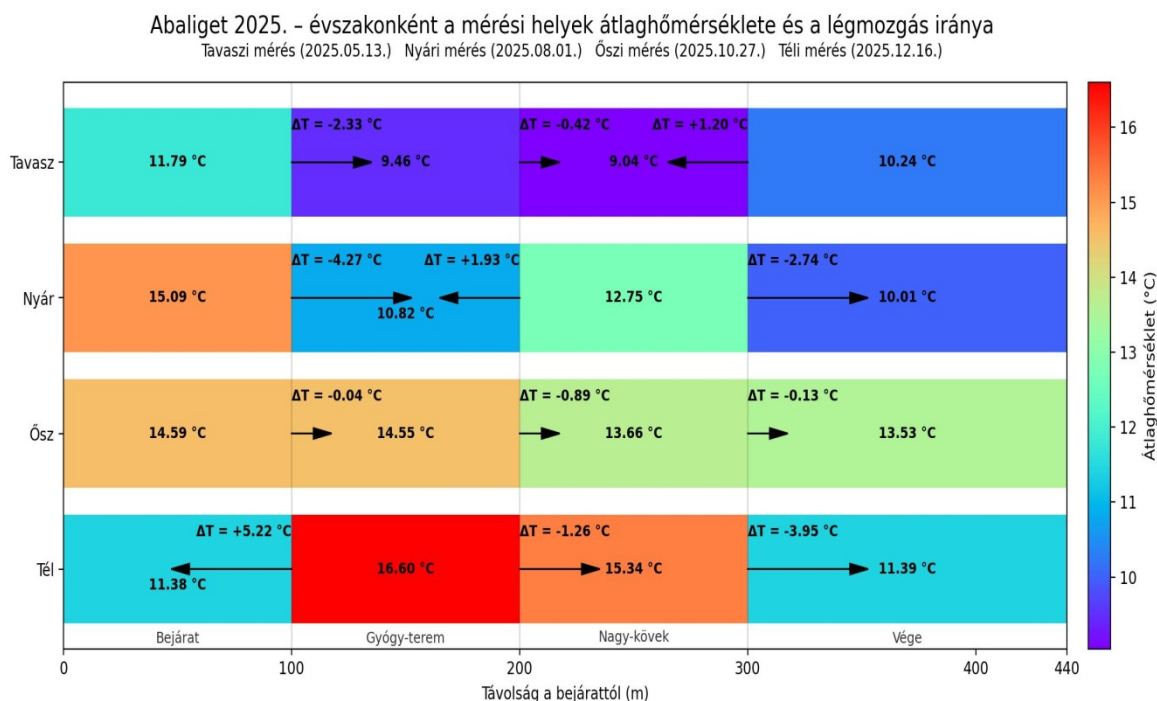
Direkt nyári vezérlés: 65–75 %

Késleltetett (puffer) hatás: 25–30 %

A puffer arány jelentős, egyértelműen alátámasztja, hogy az Abaligeti-barlang nem csupán követi, hanem integrálja és újra elosztja a felszíni hőenergia-változásokat.

Az Abaligeti-barlang egy többlépcsős puffer rendszer.

38. ábra: Barlangi hőáramlások a mérések idején.



Direkt termikus hatások és puffer hatások valid összetettsége az Abaligeti-barlangban:

Az átlaghőmérsékleti tartományhoz színspektrumot rendeltünk továbbá feltételeztük, hogy a hőenergia és a légmozgás áramlási iránya mindig a magasabb átlaghőmérsékletű helyről az alacsonyabb átlaghőmérsékletű felé halad. A hőmérsékleti különbségeket nyilakkal jelöltük, melyek hossza arányos a nagyságukkal (nagy, közepes, kicsi). Arra számítottunk, hogy legalább a nyár–tél kontraszt egyértelműen látható lesz. Egy adott keresztmetszetben a levegő aktuális hőmérséklete azonban jelentősen eltérhet az átlaghőmérséklettől, amely inkább a sziklafalak hőmérsékletére súlyozott. Ezért a tartós energiaáramlási irány nem mindig azonos a pillanatnyi légmozgás irányával (hideg levegő beáramlás a talaj közelében, melegebb levegő visszaáramlás a plafon mentén stb.). Korábbi elemzéseink kimutatták, hogy a zónák eltérő fázisban működnek: felmelegedésük és lehűlésük különböző késéssel zajlik.

A 38. ábrán a Bejárat tavasz – nyár – ősz időszakban energiát visz be a barlangba (annak ellenére, hogy a nyári légáramlás iránya kifelé mutat), télen viszont energiát kap vissza a belső zónákból. Tavasszal a Vége zóna (puffer) energiát ad a Nagy kövek irányába, majd a nyár és ősz folyamán melegszik. Az őszi és téli mérések között a Vége zóna hőmérséklete meredeken csökkent, miközben a Gyógy terem és a Nagy kövek hőmérséklete megnőtt. Ami arra utal, hogy a Nyugati 1. pufferzóna is bekapcsolódhatott az energia megosztásba.

Összegzés az Abaligeti-barlang hőáramlásáról:

A direkt nyári vezérlés a meghatározó, ez egy **primer termikus jelenség**.

A zónák között folyamatos az energia áramlás de a pufferzónák eltérően viselkednek.

A puffer hatás egy **szekunder termikus jelenség** és egyben kiegyenlítő mechanizmus, ami a hőtartály feltöltődése után aktiválódik. A direkt és puffer folyamatok tandemben működnek: a gyors felszíni hatásokat mindig követik a lassabb, kiegyenlítő hatások. Ez a kettősség teszi az Abaligeti-barlangot **dinamikusan stabil termikus rendszerré**.

7. Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti az Abaligeti-barlang túravezetői csapatát segítő együttműködésükért, valamint a Duna–Dráva Nemzeti Park Igazgatóságát és Závoczky Szabolcs, István Imre vezetőket az engedélyek támogatásáért, valamint Parrag Tibort a kutatási engedély előkészítéséért.

Külön köszönet Filepné Simon Gyöngyinek és Kántor Petrának a munkámban nyújtott segítségükért.

Miklós Gábor,

8000 Székesfehérvár, Kőrösmezei u. 8.

mikgab@datatrans.hu 06-20-669-4819



Irodalom:

Badino, G. (2010):

Underground meteorology – “What’s the weather underground?”

(Földalatti meteorológia, milyen az időjárás a föld alatt?) (Acta Carsologica 39.)

Michele Motta-Luigi Motta (2017):

The climatic study of caves with single entrance: temperatures, humidity, thermal exchanges

(Az egy bejáratú barlangok klímájának vizsgálata: hőmérséklet, páratartalom, hőcsere)

Miklós Gábor (2023.):

Klíma megfigyelések hőkamerával az Abaligeti-barlangban és az Akácos víznyelőnél

(Rónaki László- emlékkonferencia 2023.)

Miklós Gábor (2025): Hajnóczy Barlangkutató SE 2024. évi jelentése (2025):

Kutatási jelentés az Odorvári Hasadék-barlang (ktsz.5382-4) kutatásáról –

Barlangi hőkamerás termikus – globál (termesztevedelem.hu)

Stredová, Streda,Vysoudil (2014):

Cave rock surface temperatura evaluation using non-contact measurement methods

(Barlangi kőzetfelszínnek hőmérsékletének értékelése érintésmentes érzékelési módszerekkel)